

Pengembangan Model Optimasi Pemeliharaan Jalan Tahun Jamak dengan Batasan Anggaran

Febri Zukhruf

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia, E-mail: febri.zukhruf@ftsl.itb.ac.id

Russ Bona Frazila

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia, E-mail: frazila@yahoo.com

Jzolanda Tsavalista Burhani

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia, E-mail: jzolanda.tb@gmail.com

Rafika Almira Samantha Ag

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia, E-mail: rafikaalmira@gmail.com

Abstract

Pavement maintenance has longtermly been perceived as an essential factor for the road network efficiency and the driver safety. However, these activities involve the challenge issues relating to the pavement aging, the deterioration mechanism, and the available budget constraints. This paper then presents an optimization model for handling the multiyear maintenance programs in the network-level by including budget constraint. The model is developed as a mathematical programming problem, in which the Lagrange relaxation-based procedure is invoked for solving the problem. The numerical examples are also presented for providing the better insight of model application, in which the model could provide not only the multiyear maintenance programs but also the optimum budget allocation by considering the expected roughness performance of road network.

Keywords: *Multiyear pavement maintenance, network-level, mathematical programming, lagrange relaxation, greedy heuristics*

Abstrak

Pemeliharaan perkerasan jalan telah lama dianggap sebagai faktor penting dalam menentukan efisiensi jaringan jalan. Namun, kegiatan ini selalu melibatkan tantangan yang berkaitan dengan penuaan perkerasan, mekanisme deteriorasi, dan keterbatasan anggaran yang tersedia. Makalah ini kemudian mengusulkan model optimasi matematika untuk strategi pemeliharaan jalan tahun jamak pada level jaringan. Model ini bertugas untuk menentukan jenis kegiatan pemeliharaan dan waktunya dengan tujuan meminimalkan nilai International Roughness Index (IRI) melalui pengoptimalan pemanfaatan alokasi anggaran. Untuk menginvestigasi aplikabilitas dari model ini, eksperimen numerikal dilakukan pada jaringan jalan sederhana. Hasil dari eksperimen tersebut mengindikasikan kemampuan model tidak hanya dapat digunakan untuk merencanakan kegiatan pemeliharaan tahun jamak dengan batasan anggaran, akan tetapi juga dapat digunakan untuk memberikan masukan terkait penentuan alokasi anggaran dengan mengkonsiderasikan performa yang ingin dicapai.

Kata Kunci: *Pemeliharaan jalan tahun jamak, level jaringan, pemrograman matematika, lagrange relaxation, greedy heuristics*

1. Pendahuluan

Kondisi perekonomian sangat dipengaruhi oleh kualitas dan kuantitas sarana dan prasarana transportasi yang tersedia. Sebagai salah satu negara kepulauan terbesar di dunia, transportasi laut, dan moda berbasis rel belum dikembangkan secara substansial. Akibatnya, transportasi jalan masih menjadi tulang punggung kegiatan transportasi di Indonesia. Selain itu, kualitas jalan umumnya tidak hanya ditentukan pada tahap perencanaan, akan tetapi ditentukan pula pada tahapan

pemeliharaan jalan yang harus direncanakan dengan baik. Kegiatan pemeliharaan yang baik berperan dalam menjaga umur layan sesuai dengan target perencanaan. Aktivitas pemeliharaan jalan pada umumnya merujuk pada tiga kegiatan utama, yaitu preservasi, pemeliharaan dan rehabilitasi. Namun, kegiatan ini selalu melibatkan tantangan yang berkaitan dengan penuaan perkerasan, mekanisme deteriorasi, dan keterbatasan anggaran yang tersedia.

Pedoman pembentukan program pemeliharaan jalan

yang ada sejauh ini masih menggunakan pendekatan yang berbasis urutan nilai kondisi terkini jalan. Berdasarkan pedoman yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, nilai kondisi terkini jalan diperoleh melalui indikator kondisi jalan yang telah ditabulasi. Indikator tersebut seperti penilaian kondisi, retak-retak, persentase kerusakan, terdapat tambalan dan lubang, kekasaran permukaan dan terdapat ambblas. Selanjutnya berdasarkan nilai kelas LHR yang telah dikelompokkan serta nilai kondisi terkini jalan, dapat diperoleh prioritas program pemeliharaan ruas jalan. Terdapat tiga jenis program pemeliharaan yaitu program pemeliharaan rutin, pemeliharaan berkala dan peningkatan. Terlepas dari beberapa keunggulan dalam hal kemudahan, pendekatan umumnya membutuhkan biaya pengumpulan data yang tidak sedikit. Proses penilaian kondisi jalan harus melalui beberapa jenis survei lapangan. Implikasi dari hal tersebut adalah kebutuhan sumber daya yang tinggi. Namun, anggaran yang disediakan untuk pemeliharaan jalan terbatas. Selain itu, pendekatan ini tidak dapat digunakan untuk perencanaan tahun jamak pada level jaringan.

Perspektif pemeliharaan jalan seringkali dianggap terpisah dengan konteks jaringan jalan itu sendiri. Sehingga, kegiatan ini dianggap sebagai kegiatan serupa yang berulang setiap tahun pada level segmen jalan, padahal setiap kegiatan pemeliharaan memiliki dampak terhadap perubahan pola perjalanan dalam jaringan. Oleh karenanya, pendekatan pemeliharaan pada level jaringan menjadi perhatian yang besar pada banyak peneliti dalam beberapa dekade ini (e.g., Chan *et al.*, 1994; Fwa *et al.*, 1996; Lee dan Madanat, 2014, 2015, 2017; Lee *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017). Menempatkan konteks pemeliharaan pada level jaringan kemudian berkorelasi secara langsung adanya keterbatasan pendanaan atau anggaran untuk pemeliharaan. Dimana sevara sederhana, bahwa dengan menganggap bahwa pekerjaan pemeliharaan jaringan sebagai sebuah satu kesatuan, maka secara praktis pekerjaan ini tidak dapat diselesaikan dalam satu tahun saja. Kondisi ini juga terbukti di Indonesia pada beberapa ruas panjang (e.g., Jalan Lintas Timur Sumatera, Jalan Nasional Kutim) yang tidak mungkin diselesaikan dalam satu tahun anggaran. Fakta-fakta serupa, kemudian menginspirasi banyak peneliti untuk mengembangkan model pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dengan basis *multiyears* (e.g., Chu dan Chen, 2012; Lee dan Madanat, 2015; Lee *et al.*, 2016; Chu dan Huang, 2018). Atas dasar ini, penelitian dalam makalah ini mengusulkan kerangka model pendekatan yang dapat mengoptimalkan anggaran yang disediakan untuk pemeliharaan jalan pada konteks tahun jamak.

Sehubungan dengan permasalahan di atas, terdapat beberapa model pemrograman yang telah diusulkan untuk menentukan program pemeliharaan yang sesuai. Model-model telah dikembangkan dalam kerangka pendekatan level segmen tunggal hingga pada level jaringan. Pendekatan pada level segmen tunggal memberikan banyak perhatian kepada strategi untuk mempertahankan segmen tunggal dengan mengelaborasi secara mendalam mekanisme deteriorasinya (misalnya, Deshpande *et al.*, 2010; Lee

dan Madanat, 2014; Bai *et al.*, 2015). Dalam level segmen tunggal, terdapat banyak sekali literatur tercatat dalam jejak akademis. Friesz dan Fernandez (1979) awalnya menangani program pemeliharaan fasilitas tunggal berbasis pendekatan formulasi menerus (*i.e.*, *continuous*) dengan memanfaatkan teori kontrol optimal (lihat juga Fernandez dan Friesz, 1981). Namun, masalah diskontinuitas perkerasan jalan menjadi isu yang mengemuka, yang kemudian menginspirasi Tsunokawa dan Schofer (1994) untuk menerapkan kurva tren model kontrol optimal untuk mengatasi masalah tersebut. Pekerjaan mereka kemudian dilanjutkan untuk menangani tidak hanya perawatan tunggal (yaitu, pelapisan ulang) tetapi juga *resealing* dan rekonstruksi (Rashid dan Tsunokawa, 2012). Pengembangan model berbasis diskrit juga telah diusulkan, yang berevolusi dari proses deteriorasi tanpa memori dengan tipe pemeliharaan tunggal (misalnya, Golabi *et al.*, 1982; Carnahan *et al.*, 1987; Fwa *et al.*, 1994), menjadi beberapa tipe pemeliharaan (misalnya, Madanat, 1993; Madanat dan Ben-Akiva, 1994), serta dengan proses deteriorasi yang tergantung pada kondisi masa lalu (misalnya, Tsunokawa *et al.*, 2002; Tsunokawa *et al.*, 2006; Deshpande *et al.*, 2010).

Sebaliknya, pendekatan pada level jaringan memandang program pemeliharaan jalan sebagai keseluruhan strategi dari jaringan jalan. Karena secara faktual pengelola jalan menangani seluruh jaringan jalan di bawah yurisdiksi mereka dalam kerangka program penganggaran multi-tahun. Sehingga popularitas pendekatan pemeliharaan pada level jaringan memperoleh perhatian yang semakin meningkat (misalnya, Lee dan Madanat, 2014, 2015, 2017; Lee *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017). Beberapa penelitian telah dilakukan di area tersebut, yang bervariasi dari model sederhana hingga yang lebih kompleks. Model yang lebih sederhana dibangun dengan mengasumsikan bahwa proses deteriorasi adalah tanpa memori (misalnya, Chan *et al.*, 1994; Fwa *et al.*, 1996) dan itu hanya mencakup perawatan tunggal untuk menjaga kondisi perkerasan (misalnya, Ouyang dan Madanat, 2004; Ouyang, 2007). Sebaliknya, model yang lebih kompleks mempertimbangkan keterlibatan kerusakan yang tergantung pada kondisi masa lalu dengan beberapa tipe pemeliharaan (misalnya, Chu dan Chen, 2012; Lee *et al.*, 2016), di mana teknik solusi berbasis metaheuristik (misalnya, Lee dan Madanat, 2015) dan metode berbasis Lagrange (misalnya, Lee dan Madanat, 2017) digunakan.

Makalah ini kemudian mengusulkan model untuk program pemeliharaan jalan pada level jaringan yang dibangun pada kerangka pemodelan matematika berbasis optimasi (misalnya, Fwa *et al.*, 1996; Lee dan Madanat, 2015; Zhang *et al.*, 2017), dimana usulan model bertugas mengoptimalkan pemanfaatan alokasi anggaran dengan meminimalkan *International Roughness Index* (IRI) pada tingkat jaringan. Model optimasi ini diselesaikan dengan teknik pemecahan masalah berbasis pendekatan solusi eksak, secara khusus menggunakan *sub gradient optimization based Lagrangian relaxation* (Fisher, 1981). Aplikabilitas dari model selanjutnya diinvestigasi pada skala jaringan kecil melalui eksperimen numerikal.

2. Kerangka Pemodelan

2.1 Model optimasi

Pada bagian ini, kerangka model pengambilan keputusan terkait pemeliharaan jalan pada level jaringan dideskripsikan, yang dibangun dalam konteks model optimasi. Model optimasi ini memiliki tujuan untuk meminimalkan nilai total IRI pada jaringan jalan dengan memilih jenis kegiatan pemeliharaannya pada masing-masing segmen jalan dan tahun penanganannya. Jenis kegiatan pemeliharaan dalam makalah ini disederhanakan hanya menjadi tiga tipe saja yaitu, pemeliharaan bersifat mayor (i.e., *overlay*), pemeliharaan bersifat minor (i.e., *fog seal*), dan tanpa pemeliharaan (i.e., *do-nothing*). Nilai IRI pada segmen jalan akan mengikuti fungsi penurunan sederhana yang dipengaruhi oleh nilai IRI tahun sebelumnya, umur perkerasan, beban lalu lintas dan jenis kegiatan pemeliharaan. Setiap tipe kegiatan memiliki dampak terhadap perbaikan IRI segmen jalan, dimana kegiatan pemeliharaan mayor akan memberikan penurunan nilai IRI terbesar jika dibandingkan dengan tipe kegiatan lainnya. Meskipun tipe kegiatan pemeliharaan mayor memiliki biaya penanganan terbesar jika dibandingkan jenis kegiatan pemeliharaan lainnya. Model dikembangkan untuk menangani kegiatan pemeliharaan tahun jamak, meskipun proses implementasi kegiatan pemeliharaan akan dibatasi oleh alokasi anggaran pemeliharaan tahunan. Sehingga model berperan mencari strategi terbaik untuk kegiatan pemeliharaan.

Berdasarkan kepada konsep dasar di atas, model optimasi untuk pemeliharaan jalan pada level jaringan tahun jamak kemudian dituliskan pada formula berikut, yang dimodifikasi dari Chu dan Huang (2018):

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{t=2}^{T+1} R_{jt} \quad (1)$$

s.t

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^3 c_i b_{ijt} \leq C_t; \forall t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J c_1 b_{1jt} \leq C_t; \forall t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J c_2 b_{2jt} \leq C_t; \forall t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^3 b_{ijt} = 1; \forall t = 1, \dots, T, j = 1, \dots, J \quad (5)$$

$$r_{ijt} = b_{ijt} \left(n_{jt} \left(f_j^k, e^k \right) + g_{jt} + R_{j,(t-1)} \right); \quad (6)$$

$$\forall t = 1, \dots, T, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, I$$

$$\sum_{i=1}^3 r_{ijt} = R_{jt}; \quad (7)$$

$$\forall t = 1, \dots, T, j = 1, \dots, J$$

dimana:

R_{jt} : nilai IRI pada segmen $-j$ pada tahun $-t$

c_i : biaya untuk mengimplementasi tipe kegiatan pemeliharaan $-i$, dimana $i=1,2,3$ menunjukkan pemeliharaan mayor, minor dan *do-nothing*

b_{ijt} : variabel biner yang menunjukkan apakah kegiatan pemeliharaan $-i$ dipilih untuk segmen jalan $-j$ pada tahun $-t$

C_t : jumlah anggaran pemeliharaan pada tahun $-t$

r_{ijt} : nilai IRI pada segmen $-j$ pada tahun $-t$ jika kegiatan i dilakukan,

n_{jt} : beban lalu lintas segmen $-j$ pada tahun $-t$

f_j^k : arus lalu lintas moda k di segmen $-j$

e^k : *vehicle damage factor* (VDF) moda k

g_{jt} : umur pekerasan segmen $-j$ pada tahun $-t$

Persamaan (1) merupakan fungsi tujuan dari model optimasi ini, yang berusaha meminimalkan nilai IRI jaringan jalan selama periode analisis. Sementara itu, persamaan (2) – (4) menjelaskan adanya batasan anggaran pada setiap tahun dalam melakukan kegiatan pemeliharaan. Persamaan (5) memastikan bahwa setiap segmen hanya dapat memperoleh satu kegiatan saja dalam setiap tahunnya. Proses penurunan maupun perbaikan IRI kemudian diilustrasikan pada persamaan (6) dan (7) yang merupakan fungsi dari beban lalu lintas, umur perkerasan, dan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan (i.e., b_{ijt}).

2.2 Metode penyelesaian permasalahan optimasi

Untuk menyelesaikan model optimasi tersebut, *sub gradient optimization* berbasis *lagrangian relaxation* (Fisher, 1981) kemudian diusulkan. Metode solusi ini telah terbukti mampu menyelesaikan permasalahan optimasi dengan melepaskan fungsi kendala untuk kemudian dimasukkan ke dalam fungsi tujuan. Kendala batasan biaya pada persamaan (2), (3), dan (4) selanjutnya dipilih (lihat persamaan (8)), yang diharapkan mampu menurunkan waktu dalam proses penyelesaian permasalahan optimasi (Chu dan Huang, 2018).

$$\min \left[\sum_{j=1}^J \sum_{t=2}^{T+1} y_{jt} + \sum_{t=1}^T \beta_t \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^3 c_i b_{ijt} - C_t \right) + \sum_{t=1}^T \chi_t \left(\sum_{j=1}^J b_{1jt} - C_t / c_1 \right) + \sum_{t=1}^T \mu_t \left(\sum_{j=1}^J b_{2jt} - C_t / c_2 \right) \right], \quad (8)$$

$$\forall t = 1, \dots, T$$

s.t

persamaan. (5) – (7)

$$\beta_t, \chi_t, \mu_t \geq 0 \quad (9)$$

Dimana β_t, χ_t, μ_t adalah *lagrangian multiplier* yang berkaitan dengan relaksasi kendala (2), (3), dan (4). Solusi dari lagrangian dapat dianggap sebagai solusi *lower bound solution*, sementara *upper bound solution* akan disediakan oleh *greedy heuristics algorithm* yang memiliki beberapa tahapan utama, sebagai berikut (Chu dan Huang, 2018).

Tahap 1: Inisialisasi nilai R_{jt} , $b_{ijt} = 0$, $COST = 0$ dan tetapkan $t = 1$.

Tahap 2: Hitung semua nilai r_{ijt} dan BCR_{ijt} pada setiap segmen- j dan tipe kegiatan- i dengan persamaan berikut:

$$BCR_{ijt} = \begin{cases} 0 & \text{jika } i = 3 \\ \frac{r_{3jt} - r_{ijt}}{c_i} & \text{jika } i \neq 3 \end{cases} \quad (11)$$

$\forall j = 1, \dots, J, i = 1, 2, 3$

Tahap 3: Urutkan seluruh nilai BCR_{ijt} dari yang terbesar hingga yang terkecil, kemudian lakukan prosedur berikut:

```

for  $i \in \{1, 2, 3\}$ 
if  $COST + c_i \leq C_t$ 
     $b_{ijt} = 1$ 
     $COST = COST + c_i$ 
break
endif
endfor

 $R_{jt} = \sum_{i=1}^3 b_{ijt} r_{ijt}$ 
    
```

(12)

Tahap 4: Hitung *fitness value* sesuai persamaan (1), kemudian tetapkan $t=t+1$, jika $t \leq T$ kembali ke tahap 2, dan hentikan prosedur jika sebaliknya.

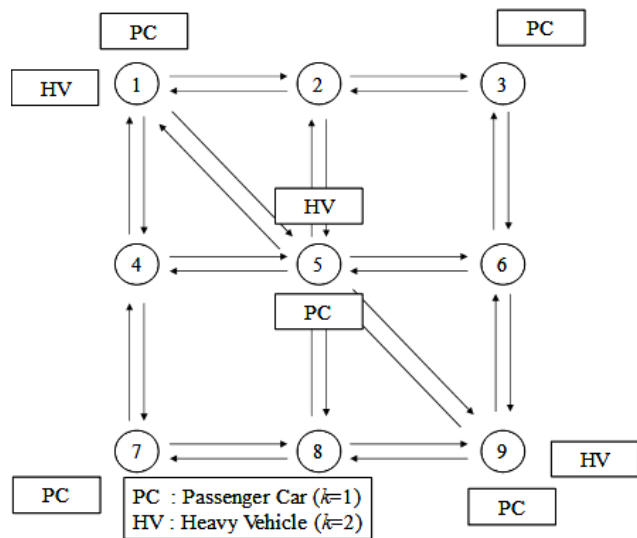
3. Eksperimen Numerikal

Model optimasi yang telah dielaborasi pada bagian sebelumnya kemudian diujicoba pada jaringan dengan mengkonsiderasikan dua moda utama yaitu mobil penumpang (i.e., PC) dan kendaraan berat (i.e., HV). Jaringan sederhana ini mencakup 3 pasangan asal tujuan (i.e. OD) untuk kendaraan berat, 5 pasang untuk kendaraan penumpang, 9 *nodes*, dan 28 *links*, yang kemudian disimplifikasi sebagai 28 segmen jalan.

Arus lalu lintas yang melewati segmen diestimasi melalui model pembebanan lalu lintas dengan beban

kepada perkerasan diestimasi dengan model VDF berikut:

$$e^k = \left(\frac{m_{front}^k}{8.16} \right)^4 + 0.086 \left(\frac{m_{rear}^k}{8.16} \right)^4 \quad (10)$$



Gambar 1. Jaringan yang diujicoba

Dimana m_{front}^k dan m_{rear}^k menunjukkan beban pada as pada bagian depan dan belakang dari moda k . Sementara itu, penurunan nilai IRI terhadap waktu, beban lalu lintas, dan jenis penanganan diestimasi menggunakan model kerusakan di bawah ini. Model ini terinspirasi dari Paterson and Attoh-Okine (1992) yang secara konseptual telah digunakan pada beberapa studi sebelumnya (i.e., Chu, dan Huang, 2018; Lee, dan Madanat, 2015) :

$$r_{1,j,t+1} = b_{1jt} \left(2.100 + 0.200 y_{jt} + 0.200 \varepsilon_{jt}^{+1} 0.000 n_{jt} \right); i = 1 \quad (11)$$

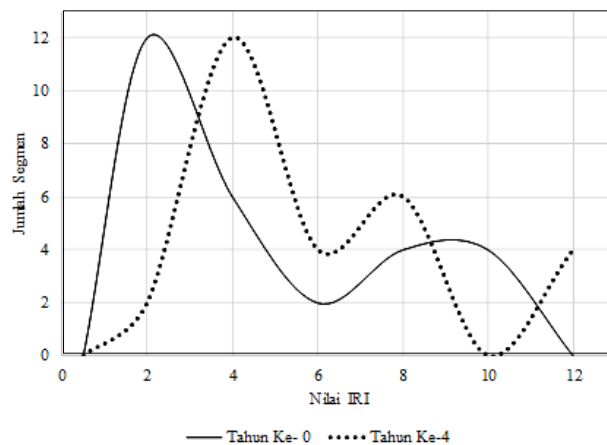
$$r_{2,j,t+1} = b_{2jt} \left(0.000 + 1.001 y_{jt} + 1.001 \varepsilon_{jt}^{+1} 0.055 n_{jt} \right); i = 2 \quad (12)$$

$$r_{3,j,t+1} = b_{3jt} \left(0.000 + 1.003 y_{jt} + 1.003 \varepsilon_{jt}^{+1} 0.055 n_{jt} \right); i = 3 \quad (13)$$

Kondisi awal dari IRI diberikan di awal dengan membuat tiga tingkatan IRI yaitu bernilai 2 hingga 4, 5 hingga 8, dan 9 hingga 10 yang distribusikan secara acak kepada jaringan yang diujicoba.

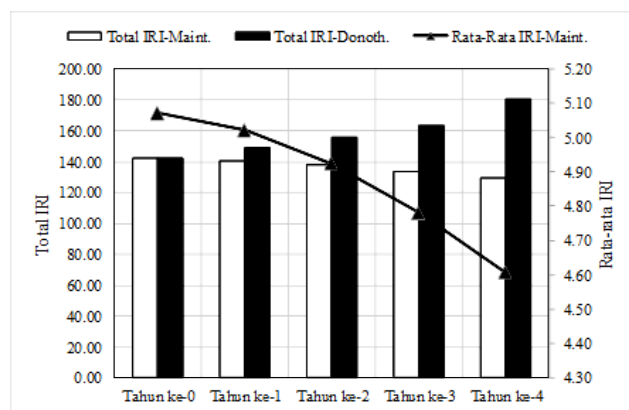
Tahapan pertama yang dilakukan dalam menginvestigasi keteraplikasian dari model adalah dengan melakukan eksplorasi kondisi nilai IRI secara jaringan dengan skenario tanpa adanya alokasi anggaran untuk pemeliharaan. **Gambar 2** menunjukkan distribusi dari

nilai IRI pada tahun ke-0 dan tahun ke-4 tanpa adanya kegiatan pemeliharaan. Dapat terlihat bahwa distribusi nilai IRI pada tahun ke-4 bergeser ke arah kanan jika dibandingkan tahun ke-0, yang mengilustrasikan terdapatnya penurunan kondisi permukaan jalan sebagai akibat dari tidak adanya kegiatan pemeliharaan.



Gambar 2. Distribusi nilai IRI pada jaringan tanpa kegiatan pemeliharaan

Untuk mencegah penurunan kondisi permukaan jalan ini, kegiatan pemeliharaan dalam jaringan tersebut penting untuk dirumuskan. Makalah ini kemudian melakukan eksperimen numerikal dengan menganggap bahwa biaya untuk melakukan implementasi pemeliharaan mayor adalah 10 kali lebih besar dari pemeliharaan minor. Selain itu, diasumsikan bahwa pemerintah hanya memiliki anggaran yang setara dengan biaya pemeliharaan mayor untuk 2 segmen pada setiap tahunnya.



Gambar 3. Penurunan nilai total dan rata-rata IRI pada jaringan setelah kegiatan pemeliharaan

Gambar 3 menunjukkan hasil dari proses optimasi pengambilan keputusan untuk kegiatan pemeliharaan jaringan jalan. Nilai IRI secara total pada jaringan bergerak turun jika dibandingkan kepada skenario tanpa penanganan (i.e., *do-nothing*). Selain itu, secara rata-rata nilai IRI pada jaringan tersebut juga menurun seiring dengan adanya alokasi anggaran setara 2 kali biaya pemeliharaan mayor setiap tahunnya. Selain memberikan informasi nilai IRI total maupun rata-rata pada jaringan,

model dalam makalah ini dapat pula menghasilkan jenis pemeliharaan yang diperlukan setiap tahunnya pada setiap segmen. Tabel berikut memberikan gambaran contoh rencana pemeliharaan pada beberapa segmen secara optimum dalam rangka memperbaiki kondisi permukaan jaringan dengan batasan anggaran tertentu.

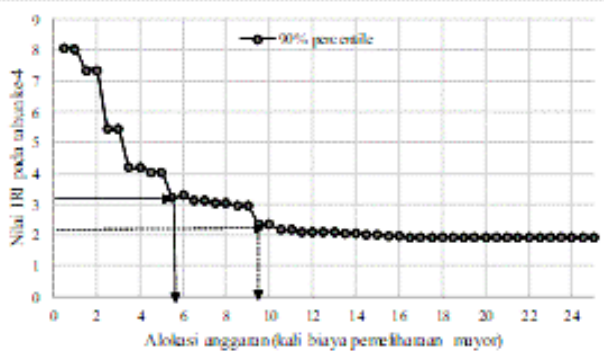
Tabel 1. Contoh rencana kegiatan pemeliharaan tahun jamak pada beberapa segmen

Link	Tahun ke-1	Tahun ke-2	Tahun ke-3	Tahun ke-4
1-5	minor	major	do-nothing	do-nothing
4-5	minor	minor	minor	minor
5-1	major	do-nothing	do-nothing	do-nothing
5-4	minor	minor	minor	minor
5-6	minor	minor	minor	minor
5-8	minor	minor	minor	minor
5-9	minor	minor	major	do-nothing
6-5	minor	minor	minor	minor
8-5	minor	minor	minor	minor
9-5	minor	minor	minor	major

Berbeda dengan perspektif berpikir yang ditawarkan pada **Tabel 1** dengan adanya batasan anggaran tertentu. Penggunaan model ini sesungguhnya dapat pula digunakan sebagai alat bantu mengestimasi alokasi biaya optimal dalam kegiatan pemeliharaan jalan. Dengan menggunakan model ini, simulasi terkait skenario batasan anggaran dapat dilakukan secara mudah, dengan menaikkan maupun menurunkan batasan anggaran. Pada setiap skenario batasan anggaran, nilai IRI yang mewakili 90% keadaan jaringan digunakan untuk menganalisis kondisi jaringan jalan. Sehingga jika terdapat dilakukan beberapa skenario batasan anggaran, maka akan terdapat kurva yang menggambarkan hubungan antara batasan anggaran dengan kondisi perkerasan jaringan jalan. **Gambar 4** memberikan ilustrasi penentuan alokasi anggaran optimum untuk kegiatan pemeliharaan setiap tahunnya. Sebagai contoh, pada gambar tersebut, jika pengelola bermaksud melakukan penyusunan anggaran strategis dengan target pada akhir tahun ke-4 90% jalan memiliki nilai IRI di bawah 4, maka diperlukan alokasi anggaran sebesar biaya yang setara dengan 6 kali biaya pemeliharaan mayor.

Selain itu, dari **Gambar 4** dapat terlihat bahwa perubahan kelandaian dari grafik tersebut mencapai puncaknya pada alokasi biaya yang setara dengan 9 kali biaya pemeliharaan mayor. Kondisi ini dapat diartikan bahwa investasi yang setara dengan lebih dari 9 kali biaya pemeliharaan tidak efisien dalam konteks pemeliharaan jaringan jalan, karena akan memberikan kontribusi penurunan IRI yang tidak signifikan dalam konteks jaringan.

Hasil eksperimen numerikal pada jaringan sederhana memberikan indikasi bahwa model dapat digunakan sebagai alat bantu dalam melakukan proses perencanaan pemeliharaan jalan. Meskipun pada tahapan selanjutnya, investigasi terhadap aplikabilitas model dalam jaringan ril dengan ukuran yang lebih besar perlu dilakukan. Tahapan tersebut berperan untuk memverifikasi dan memvalidasi model yang diusulkan. Validasi dilakukan baik pada kerangka basis model lalu



Gambar 4. Nilai 90 % persentil IRI pada tahun ke-4 berdasarkan alokasi anggaran

lintasnya, model kerusakan jalannya, maupun model pengambilan keputusannya.

4. Kesimpulan

Makalah ini mengusulkan model untuk program pemeliharaan jalan tahun jamak pada level jaringan, yang dibangun dalam kerangka pemodelan matematika berbasis optimasi. Model matematika ini berperan dalam memutuskan jenis kegiatan pemeliharaan dan waktunya, dengan mengoptimalkan pemanfaatan alokasi anggaran serta meminimalkan nilai IRI jaringan. Model optimasi diselesaikan dengan menggunakan pendekatan *sub gradient optimization* berdasarkan *lagrangian relaxation*. Selain mengkonsiderasikan batasan anggaran, model ini mempertimbangkan pula karakteristik beban jaringan jalan (e.g., jenis kendaraan, OD, VDF) dan model kerusakan jalan untuk merepresentasikan kondisi jaringan secara lebih baik.

Hasil dari eksperimen numerikal pada jaringan sederhana menunjukkan bahwa model yang diusulkan mampu merencanakan kegiatan pemeliharaan tahun jamak dengan batasan anggaran. Selain itu, penentuan alokasi anggaran optimum dapat pula dihasilkan dengan mengkonsiderasikan performa yang ingin dicapai melalui simulasi skenario batasan anggaran. Pada penelitian selanjutnya, model yang diusulkan akan dicoba pada jaringan aktual dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dalam rangka memvalidasi model yang diusulkan.

Acknowledgment

Penelitian ini didukung oleh Program Riset ITB 2019 yang didanai melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat ITB No. PN-6-03-2019.

Referensi

Bai, Y., Gungor, O. E., Hernandez-Urrea, J. A., Ouyang, Y., & Al-Qadi, I. L. (2015). Optimal pavement design and rehabilitation planning using a mechanistic-empirical approach. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(1), 57–73. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0072-2>

Carnahan, J. V., Davis, W. J., Shahin, M. Y., Keane, P. L., & Wu, M. I. (1987). Optimal Maintenance Decisions for Pavement Management. *Journal of Transportation Engineering*, 113(5), 554–572. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1987\)113:5\(554\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1987)113:5(554))

Chan, W. T., Fwa, T. F., & Tan, C. Y. (1994). Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. I: Formulation. *Journal of Transportation Engineering*, 120(5), 693–709. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:5\(693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:5(693))

Chu, J. C., & Chen, Y.-J. (2012). Optimal threshold-based network-level transportation infrastructure life-cycle management with heterogeneous maintenance actions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(9), 1123–1143. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2012.05.002>

Chu, J. C., & Huang, K.-H. (2018). Mathematical programming framework for modeling and comparing network-level pavement maintenance strategies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 109, 1–25. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2018.01.005>

Deshpande, V. P., Damnjanovic, I. D., & Gardoni, P. (2010). Reliability-Based Optimization Models for Scheduling Pavement Rehabilitation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(4), 227–237. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00636.x>

Fernandez, J. E., & Friesz, T. L. (1981). Influence of Demand-Quality Interrelationships on Optimal Policies for Stage Construction of Transportation Facilities. *Transportation Science*, 15(1), 16–31. <https://doi.org/10.1287/trsc.15.1.16>

Fisher, M. L. (1981). The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems. *Management Science*, 27(1), 1–18. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0263>

Friesz, T. L., & Fernandez, J. E. (1979). A model of optimal transport maintenance with demand responsiveness. *Transportation Research Part B: Methodological*, 13(4), 317–339. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(79\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(79)90025-0)

Fwa, T. F., Chan, W. T., & Tan, C. Y. (1996). Genetic-Algorithm Programming of Road Maintenance and Rehabilitation. *Journal of Transportation Engineering*, 122(3), 246–253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:3\(246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:3(246))

Fwa, T. F., Tan, C. Y., & Chan, W. T. (1994). Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. II: Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 120(5), 710–722. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:5\(710\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:5(710))

- doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:5 (710)
- Golabi, K., Kulkarni, R. B., & Way, G. B. (1982). A Statewide Pavement Management System. *Interfaces*. INFORMS. <https://doi.org/10.2307/25060344>
- Lee, J., & Madanat, S. (2014). Joint optimization of pavement design, resurfacing and maintenance strategies with history-dependent deterioration models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 68, 141–153. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2014.06.008>
- Lee, J., & Madanat, S. (2015). A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 78, 106–122. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2015.05.001>
- Lee, J., & Madanat, S. (2017). Optimal policies for greenhouse gas emission minimization under multiple agency budget constraints in pavement management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 39–50. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.06.009>
- Lee, J., Madanat, S., & Reger, D. (2016). Pavement systems reconstruction and resurfacing policies for minimization of life-cycle costs under greenhouse gas emissions constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 93, 618–630. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2016.08.016>
- Madanat, S. (1993). Incorporating inspection decisions in pavement management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(6), 425–438. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(93\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0191-2615(93)90015-3)
- Madanat, S., & Ben-Akiva, M. (1994). Optimal Inspection and Repair Policies for Infrastructure Facilities. *Transportation Science*, 28(1), 55–62. <https://doi.org/10.1287/trsc.28.1.55>
- Ouyang, Y. (2007). Pavement Resurfacing Planning for Highway Networks: Parametric Policy Iteration Approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 13 (1), 65–71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2007\)13:1\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:1(65))
- Ouyang, Y., & Madanat, S. (2004). Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(5), 347–365. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2003.10.007>
- Paterson, W.D.O., Attoh-Okine, B. (1992). Summary models of paved road deterioration based on HDM-III. *Transp. Res. Rec.* 1344, 99–105.
- Rashid, M. M., & Tsunokawa, K. (2012). Trend Curve Optimal Control Model for Optimizing Pavement Maintenance Strategies Consisting of Various Treatments. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(3), 155–169. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00671.x>
- Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2017). A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1380–1393. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.027>
- Tsunokawa, K., Riaz-ul-Islam, & Changyu, G. (2002). Optimal Strategies for Highway Pavement Management in Developing Countries. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17(3), 194–202. <https://doi.org/10.1111/1467-8667.00267>
- Tsunokawa, K., & Schofer, J. L. (1994). Trend curve optimal control model for highway pavement maintenance: Case study and evaluation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 28(2), 151–166. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90035-3)
- Tsunokawa, K., Van Hiep, D., & Ul-Islam, R. (2006). True Optimization of Pavement Maintenance Options with What-If Models. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(3), 193–204. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00427.x>
- Zhang, L., Fu, L., Gu, W., Ouyang, Y., & Hu, Y. (2017). A general iterative approach for the system-level joint optimization of pavement maintenance, rehabilitation, and reconstruction planning. *Transportation Research Part B: Methodological*, 105, 378–400. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2017.09.014>

